

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

“ANÁLISIS DINÁMICO LINEAL MEDIANTE UN MÉTODO SIMPLIFICADO Y UN MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DE UN TANQUE PARA CONTENCIÓN DE HIDROCARBUROS”

Trabajo de Titulación previo a la obtención
del Título de Ingeniero Civil

AUTORES:

ORLANDO GUERRERO VERDUGO
FRANCISCO JOSE SANCHEZ CORDERO

DIRECTOR:

ING. JORGE MOSCOSO FERNÁNDEZ SALVADOR MSc.
CUENCA-ECUADOR

2015



RESUMEN

Es importante conocer el efecto de las deformaciones causadas por fuerzas dinámicas en tanques de almacenamiento, usados para la contención de líquidos o en el caso de este estudio para la contención para hidrocarburos. Debido a que si la estructura presenta fallas además de un costo económico necesario para su reparación, se tendría terribles impactos al medio ambiente.

El Ecuador se ha convertido en un importante productor de petróleo, siendo esta industria una de las fuentes de mayor ingreso económico, razón por cual la construcción de este tipo de estructuras en el país ha aumentado en los últimos años.

Muchos países utilizan o recomiendan métodos simplificados para obtención de fuerzas externas en tanques debido a movimientos sísmicos. Este estudio tiene como objetivo evaluar el comportamiento de las fuerzas externas ante la variación de la esbeltez de un tanque durante un fenómeno sísmico. Se realiza un análisis comparativo de la norma NEC, empleando normas internacionales como la norma Colombiana, Mexicana y Europea.

En este trabajo se efectúa un análisis dinámico elástico, en el cual se utiliza el espectro de aceleraciones obtenido para cada norma, asignando valores adecuados a cada variable buscando obtener una semejanza en las condiciones de emplazamiento de la estructura entre las normas, factores que asemejen las condiciones que presenta la Costa Ecuatoriana. Las magnitudes de las reacciones son calculadas mediante un método simplificado y dos modelos (bidimensional y tridimensional), elaborados en el programa de elementos finitos SAP2000. Las que se evalúan para 5 tanques con diferente relación de esbeltez (H/r), y para cada norma internacional indicada; llegando a obtener una semejanza entre los modelos computacionales y simplificados, y entre las normas estudiadas.

PALABRAS CLAVES:

Tanque de Almacenamiento, Espectro de aceleraciones, Esbeltez



ABSTRACT

It is important to know the effect of the deformations caused by dynamic forces in storage tanks, used for containing liquids or in the case of this study for containing hydrocarbons. As if the structure has flaws, repair costs, as well as terrible environmental impacts will take place.

Ecuador has become a major oil producer, being this industry one of the major sources of income, which is why the construction of such structures in the country has increased in recent years.

Many countries use or recommend simplified methods for obtaining external forces in tanks due to seismic movements. This study aims to evaluate the performance of the external forces facing variation of the slenderness of a tank during a seismic event. A comparative analysis of the Ecuadorian standard is performed, using international standards such as the Colombian, the Mexican and the European.

In this paper a dynamic elastic analysis is carried out, in which the acceleration spectrum obtained for each standard is used, allocating adequate values to each variable; and with them, identify the similarities with the other standards to locate the structures in the Ecuadorian Coast. The magnitudes of the reactions are calculated using a simplified method and two (two-dimensional and three-dimensional) models, developed in the finite element program SAP2000. They are assessed for 5 tanks with different aspect ratio (H/r), and for each specified international standard; coming to get a similarity between computational and simplified models, and among the studied standards.

KEYWORDS:

Storage Tanks, Acceleration spectrum, Slenderness.



INDICE

1. CAPITULO I – INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 ANTECEDENTES.....	14
1.2 JUSTIFICACION.....	16
1.3 OBJETIVOS.....	16
1.3.1 Objetivo General.....	16
1.3.2 Objetivos Específicos.....	17
2. CAPITULO II – METODOLOGÍA	18
2.1 GENERALIDADES	18
2.2 TANQUES DE ESTUDIO	18
2.3 LÍQUIDO A ALMACENAR	19
2.4 MÉTODO SIMPLIFICADO DE MALHOTRA	20
2.5 NORMAS SÍSMICAS DE DISEÑO.....	22
2.5.1 Norma Ecuatoriana (NEC SE RE, 2014)	22
2.5.2 Eurocódigo (Eurocode8)	23
2.5.3 Norma Mexicana	24
2.5.4 Norma Colombiana – Reglamento de Construcción Sismo Resistente NSR-10	25
2.5.5 Espectros de aceleraciones con distinto amortiguamiento.....	25
2.5.6 Caracterización de los Espectros de Diseño	26
2.6 DESARROLLO DE LOS MODELOS COMPUTACIONALES	29
2.6.1 Modelo Dinámico Equivalente	29
2.6.2 Modelo de Elementos Finitos - SAP2000	31
2.6.2.1 Componente Convectiva.....	31
2.6.2.2 Componente Impulsiva	32
3. CAPITULO III – ANALISIS DE RESULTADOS	35
3.1 PERIODOS DE VIBRACIÓN	35
3.2 CORTANTE, MOMENTO Y ALTURA DE OLA.	38
3.2.1 Cortante	38
3.2.2 Momento de Vuelco	41
3.2.3 Altura de Ola	44
4. CAPITULO IV – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	45
5. BIBLIOGRAFÍA	47
6. ANEXO A.....	48



INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Efecto pata de elefante, pandeo en la pared del tanque.....	15
Figura 2. Efecto de las olas en la pared superior del tanque.	15
Figura 3. Daño en tuberías e instalaciones del tanque.	15
Figura 4. Daño en la cimentación del tanque anclado.....	16
Figura 5. Tanque almacenando líquido, modelado por un sistema generalizado de un grado de libertad.	20
Figura 6. Espectro de aceleraciones obtenido según la norma NEC	27
Figura 7. Espectro de aceleraciones obtenido según la norma Colombiana	28
Figura 8. Espectro de aceleraciones obtenido según la norma Mexicana	28
Figura 9. Espectro de aceleraciones obtenido según el Eurocodigo.....	29
Figura 10. Modelo dinámico equivalente en Sap2000.....	30
Figura 11. Modos 1 y 3 de vibración del modelo dinámico equivalente del Tanque 1	30
Figura 12. Valores de C_{0z}	33
Figura 13 Elementos frame y Shell usados para la modelización del tanque en el programa SAP2000	34
Figura 14. Deformada de los modos 1 y 2 del Tanque 1.....	36
Figura 15. Deformada de los modos 37 y 38 para el Tanque 1.	36
Figura 16. Cortante para las relaciones de H/r usando el espectro de la norma NEC.....	38
Figura 17. Cortante para las relaciones de H/r usando el espectro según el Eurocodigo	39
Figura 18. Cortante para las relaciones de H/r usando el espectro de la norma Colombiana.....	39
Figura 19. Cortante para las relaciones de H/r usando el espectro de la norma Mexicana.....	40
Figura 20. Valores de Cortante de las normas de estudio para diferentes relaciones de H/r	40
Figura 21. Momento para las relaciones de H/r usando el espectro de la norma NEC	41
Figura 22. Momento para las relaciones de H/r usando el espectro del Eurocodigo	42
Figura 23. Momento para las relaciones de H/r usando el espectro de la norma Colombiana.....	42
Figura 24. Momento para las relaciones de H/r usando el espectro de la norma Mexicana	43
Figura 25. Valores del Momento de Vuelco de las normas de estudio para diferentes relaciones de H/r	43
Figura 26. Valores de Altura de Ola de las normas de estudio para diferentes relaciones de H/r.....	44



INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Dimensiones de tanques para el estudio.	19
Tabla 2. Densidades del crudo según su tipo.	19
Tabla 3. Valores recomendados de diseño para los primeros modos de vibración impulsivo y convectivo como función de la relación altura/radio (H/r). Todos los coeficientes están basados en el modelo del sistema tanque-liquido de VELETSOS, A.S.	21
Tabla 4. FPM Tanque 1	35
Tabla 5. Valores de periodos según el análisis computacional y el método simplificado.	37
Tabla 6. FPM Tanque 2	48
Tabla 7. FPM Tanque 3	49
Tabla 8. FPM Tanque 4	50
Tabla 9. FPM Tanque 5	51



Yo, *Orlando Guerrero Verdugo*, autor de la tesis "ANALISIS DINAMICO LINEAL MEDIANTE UN METODO SIMPLIFICADO Y UN MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DE UN TANQUE PARA CONTENCIÓN DE HIDROCARBUROS", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 27 de Octubre del 2015.

Orlando Guerrero Verdugo

C.I: 0302082037



Yo, *Francisco José Sánchez Cordero*, autor de la tesis "ANALISIS DINAMICO LINEAL MEDIANTE UN METODO SIMPLIFICADO Y UN MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DE UN TANQUE PARA CONTENCIÓN DE HIDROCARBUROS", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 27 de Octubre del 2015.

Francisco José Sánchez Cordero

C.I: 0105733117



Yo, *Orlando Guerrero Verdugo*, autor de la tesis "ANALISIS DINAMICO LINEAL MEDIANTE UN METODO SIMPLIFICADO Y UN MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DE UN TANQUE PARA CONTENCIÓN DE HIDROCARBUROS", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 27 de Octubre del 2015

Orlando Guerrero Verdugo

C.I: 0302082037



Yo, *Francisco José Sánchez Cordero*, autor de la tesis "ANALISIS DINAMICO LINEAL MEDIANTE UN METODO SIMPLIFICADO Y UN MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DE UN TANQUE PARA CONTENCIÓN DE HIDROCARBUROS", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 27 de Octubre del 2015

Francisco José Sánchez Cordero

C.I: 0105733117



DEDICATORIA

A Dios y a la Virgen María, quienes me guían en todo momento y me fortalecen para continuar en mi camino.

Con mucho cariño a mis padres Orlando y María Luisa, quienes me han apoyado incondicionalmente y por ser un ejemplo a seguir en mi vida.

A mis hermanas Cristina y Carolina por apoyarme en todo momento.

A toda mi familia y amigos, quienes siempre han estado pendientes y me han animado a lo largo de toda mi vida.

Orlando.

A mis padres y hermanos que siempre están en todos los momentos de mi vida, apoyándome para ser mejor cada día.

Francisco.



AGRADECIMIENTO

A nuestros padres y hermanos; por el apoyo y consejos en todo momento. Finalizando esta etapa de aprendizaje en nuestras vidas queremos expresar un muy sincero agradecimiento al Ing. Jorge Moscoso, quien nos ha brindado su total apoyo y orientación a lo largo de este trabajo de investigación.

A todos nuestros profesores que nos han transmitido sus conocimientos durante nuestra carrera universitaria.



1. CAPITULO I – INTRODUCCIÓN

En la actualidad las estructuras cilíndricas como los tanques de contención son empleados para la adecuada suministración y acumulación de servicios básicos así como en la rama industrial, estos cumplen con el propósito de almacenar principalmente sustancias fluidas como agua, químicos y en nuestro caso de estudio, hidrocarburos (Compagnoni & Martínez, n.d.). Conociendo la importancia que tiene en nuestro país los hidrocarburos y el riesgo que estos presentan para el medio ambiente, es necesario un adecuado entendimiento del comportamiento de las estructuras que contienen y transportan estas sustancias, ante las solicitudes que pueden tener a lo largo de su vida útil.

Una gran extensión del territorio ecuatoriano está localizado en una zona que presenta un gran peligro sísmico, el cual se demuestra a través de una larga historia de actividad sísmica, que en los últimos 460 años ha provocado la destrucción de ciudades enteras como Riobamba e Ibarra, con la muerte de más de 60 000 personas (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2014). Tomando en consideración a otros poblados que poseen una alta probabilidad de riesgos sísmicos entran en consideración las ciudades de Quito, Guayaquil y Cuenca. La norma ecuatoriana de la construcción en su capítulo de peligro sísmico, menciona que para obtener un riesgo sísmico en niveles aceptables para el contexto ecuatoriano en el caso de las estructuras de ocupación especial y edificaciones esenciales, como es el caso de Tanques de almacenamiento, además de los requisitos estipulados para las estructuras de uso normal, se deben realizar verificaciones de comportamiento inelástico para diferentes niveles de terremotos.

Este estudio busca realizar un análisis comparativo del efecto del sismo en las reacciones externas de un tanque de acero para contención de Hidrocarburos, mediante métodos que se aproximen al comportamiento de los mismos. Estas comparaciones se realizarán usando un método dinámico simplificado MSM (Mass Spring Model) y un modelo de elementos finitos elaborado en el programa SAP2000, aplicando normas internacionales como la Colombiana (NSR-10), Mexicana, Europea (Eurocode8) y NEC (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2014).

1.1 ANTECEDENTES

La respuesta sísmica de los tanques de almacenamiento de líquidos se encuentra ligada con la interacción existente entre el fluido y la estructura que lo contiene, por tal motivo es importante modelar este fenómeno sometido a fuerzas horizontales debido a cargas sísmicas. De manera que su comportamiento se aproxime a la realidad, y el tanque presente un correcto funcionamiento luego de la presencia de un sismo. El interés por un comportamiento seguro bajo cargas sísmicas, radica no sólo en el costo de reposición en caso de falla, sino también en los desastres ambientales que un accidente puede provocar (Chang & Lin, 2006).

Se conoce que desde la década de los 60's, ante las dificultades de cálculo que existían debido a la falta de herramientas de cálculo computacional, se desarrollaron los modelos dinámicos simplificados (MSM), que en la actualidad siguen utilizándose en lugar de modelos más sofisticados por la simplicidad y eficacia de los mismos. Estos métodos MSM se desarrollaron con parámetros que representaban a tanques de paredes rígidas, para tanques de paredes flexibles (acero), se emplearon MSM posteriormente desarrollados, como el de Veletsos y Yang (Veletsos & Auyang, 1977) en el cual dividen a las masas de estudio en una masa para el efecto impulsivo y dos para el efecto convectivo. Haroun y Housner (Haroun & Housner, 1981), (Haroun, 1983) realizan un estudio en el cual dividen el efecto de la masa impulsiva en dos partes, una es considerada como una parte rígida adherida al tanque y la otra una masa con un movimiento relativo a la pared del tanque. Malhotra (Malhotra, Wenk, & Wieland, 2000) realiza algunas simplificaciones al modelo de Veletsos y Yang dividiendo al líquido en una componente impulsiva y otra convectiva.

Las poderosas herramientas de cálculo computacional basados en el uso de Elementos Finitos (MEF), requieren una representación adecuada de los parámetros hidrodinámicos, para mediante una adecuada representación de los mismos se obtengan los datos necesarios para evitar una falla en estas estructuras ante la presencia de un sismo. Las diferentes fallas que presentan los depósitos de almacenamiento de líquidos, tienen importantes implicaciones tanto económicas, sociales y ambientales. Los daños registrados debido a acciones sísmicas (Compagnoni, Curadelli, & Martínez, 2012), se pueden agrupar en cuatro categorías:

- Pandeo en la parte inferior del tanque: los esfuerzos de compresión axial debido al momento de vuelco son máximos en esta zona. El pandeo de la pared presenta con grandes deformaciones y es conocido como “pata de elefante” (Figura 1).
- Presencia de pandeo en la tapa o parte superior de la pared lateral del tanque: debido al efecto de oleaje del líquido durante una excitación sísmica (Figura 2).

- Destrucción de las tuberías y otros accesorios: estos se encuentran conectados rígidamente a las paredes del tanque y ante un movimiento se produce una separación de los accesorios con el tanque (Figura 3).
- Daños debido a falla en la cimentación del tanque (Figura 4).



Figura 1. Efecto pata de elefante, pandeo en la pared del tanque. Fuente: **Malhotra 2000.**



Figura 2. Efecto de las olas en la pared superior del tanque.



Figura 3. Daño en tuberías e instalaciones del tanque.



Figura 4. Daño en la cimentación del tanque anclado. Fuente: **U.C Berkeley**

1.2 JUSTIFICACION

En nuestro país la explotación del petróleo representa una gran parte del ingreso económico. Por lo cual, en la actualidad se siguen construyendo tanques de contención para este recurso, y para la construcción de estos, se debe tener un amplio conocimiento del efecto de fuerzas dinámicas que experimentan ante un sismo, debido al potencial peligro sísmico que tiene el país.

Este proyecto se enfocara en tanques que se encuentran cimentados superficialmente y su material de fabricación es el acero debido a su facilidad de construcción; al ser tanques de acero se debe realizar el estudio en contenedores de paredes flexibles, por lo que se debe seleccionar un modelo MSM que considere la flexibilidad de las paredes como el desarrollado por Malhotra (Malhotra et al., 2000), el cual será nuestro método simplificado de diseño a analizar para posteriormente compararlo con el modelo computacional de elementos finitos elaborado en el programa SAP2000.

Con base a las comparaciones realizadas obtenidas del análisis de las reacciones externas de la estructura se espera determinar la validez del diseño de tanques mediante este método simplificado y obtener pautas que ayuden a realizar un diseño simple y seguro de estas estructuras teniendo en cuenta la realidad sísmica del país.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Analizar el comportamiento de una estructura de contención de hidrocarburos bajo excitación sísmica mediante la comparación de normas.



1.3.2 Objetivos Específicos

- Aplicar un modelo analítico y un modelo numérico para comportamiento hidrodinámico del depósito.
- Validar los resultados obtenidos con los métodos analíticos y los numéricos.
- Realizar recomendaciones en base de los resultados obtenidos del análisis de varias normas para el diseño de tanques en el país.



2. CAPITULO II – METODOLOGÍA

2.1 Generalidades

Inicialmente en este capítulo se efectuara una caracterización de los tanques que se evaluarán en el estudio, detallando sus dimensiones, forma, material y líquido que se desea almacenar.

Se representara este fenómeno a través del método de Malhotra (Malhotra, Wenk, & Wieland, 2000) que divide al fluido en dos masas, una impulsiva formada por la parte inferior del líquido, representada como una masa equivalente adherida a las paredes del depósito, la cual experimenta la misma aceleración del terreno y contribuye predominantemente al cortante y momentos en la base, y una masa convectiva que actúa como una masa sujeta a las paredes por medio de resortes que representan la acción de oleaje del fluido.

Se obtendrá los espectros de aceleración de todas las normas indicadas previamente, los cuales dependen de factores como: el lugar de emplazamiento del depósito mostrado anteriormente, el tipo de suelo, además de su amortiguamiento y ductilidad. Determinando los parámetros adecuados para cada norma, que permitan realizar una comparación del análisis dinámico lineal entre ellas.

El modelo de elementos finitos realizado en el software SAP2000 está basado en el modelo simplificado realizado inicialmente por Housner, que permite dividir el fluido en dos componentes una impulsiva que se ha adherido a las paredes del tanque y una convectiva que se une con el tanque a través de barras con una rigidez k determinada y simulan el efecto del oleaje en las paredes del tanque.

2.2 Tanques de estudio

Los depósitos a analizar en este trabajo son tanques cilíndricos metálicos superficiales que se construirán con el propósito de almacenar hidrocarburos. El material usado es acero Gr 50 pues en los últimos años se ha optado por este material en lugar de concreto debido a la facilidad de construcción. Este tipo de tanques se construyen superficialmente debido al riesgo que se presente una falla y ocasione que el contenido sea derramado en el suelo, lo cual provocaría una gran contaminación.

Se ha optado por analizar 5 tanques con una relación de altura de agua – radio menor a uno, es decir $0,5 \leq H/r \leq 1$, esto se debe a que los tanques que se construyen en el país poseen relaciones que se encuentran en este rango.

Tanque	Altura Tanque (m)	Nivel del Líquido (m)	Relación H/r
1	6,5	4	0,5
2	7,5	5	0,625
3	8,5	6	0,75
4	9,5	7	0,875
5	10,5	8	1

Tabla 1. Dimensiones de tanques para el estudio.

En la tabla 1 se muestran las dimensiones de los tanques que serán evaluados en este estudio, estos se diferencian por su altura pues se ha optado por mantener constante el radio en 8 m, así como el espesor de las placas de 1 cm que conforman tanto las paredes como la tapa del tanque.

2.3 Líquido a almacenar

El país dispone de una capacidad operativa de almacenamiento de 2 662 617 barriles, repartidos en 103 tanques, 6 esferas horizontales y 10 esferas de gas que se ubican en los terminales del país (Petroecuador, 2013).

Los crudos se pueden diferenciar unos de otros con relación a la calidad por medio de la principal propiedad que es la Gravedad API (A. P. I. Standard, 2007). De acuerdo con un informe de Petroindustrial, la densidad del crudo ecuatoriano de carga cambió de 23,8° API en diciembre de 2007, a 24,0 en enero de 2008 por lo que con esta característica se puede determinar la densidad del hidrocarburo.

Crudo	Escala API	Densidad
Ligero	30 - 40°	0,87 - 0,83 g/cm ³
Mediano	22 - 29,9°	0,92 - 0,87 g/cm ³
Pesado	10 - 21,9°	1,00 - 0,92 g/cm ³
Extrapesado	Menos 10°	> 1,00 g/cm ³

Tabla 2. Densidades del crudo según su tipo.

El crudo del Ecuador entra en el segundo rango, es decir un crudo mediano por lo cual se ha determinado que en este estudio se usara un crudo con una densidad de 0,90 g/cm³.

2.4 Método simplificado de Malhotra

Varios métodos han sido desarrollados previamente, con modelos simplificados representados mediante un sistema masa-resorte, simplificando el análisis de las fuerzas hidrodinámicas producidas en las paredes del tanque. Malhotra (Malhotra et al., 2000) realizó modificaciones al modelo simplificado propuesto por Veletsos y Yang (Veletsos & Auyang, 1977).

Este método proporciona un procedimiento para el diseño sísmico de un tanque cilíndrico mediante el análisis elástico de tanques anclados y cimentados superficialmente, es decir fundaciones rígidas, tomando en cuenta la acción de las fuerzas impulsivas y convectivas. (Malhotra et al., 2000) Se basa en el modelamiento de estas fuerzas a través de un sistema de un grado de libertad. El método considera la parte inferior del líquido, conocido como líquido impulsivo que se considera unido a las paredes, el cual experimenta la misma aceleración que el suelo y aporta en gran parte al cortante basal y al momento del vuelco. Mientras que la parte superior del líquido experimenta un efecto de (sloshing) o chapoteo producido por las ondas del mismo, lo que es necesario conocer pues determina la altura de las olas y por ende la altura mínima libre requerida.

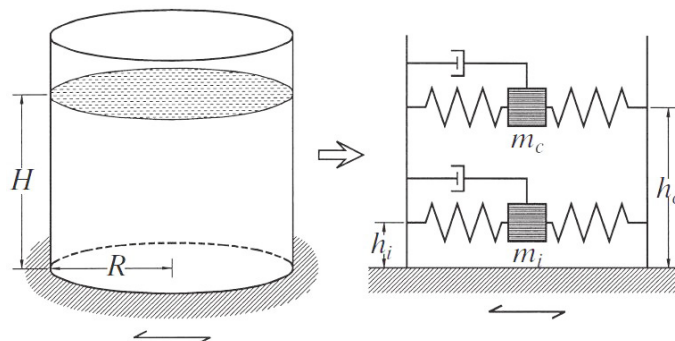


Figura 5. Tanque almacenando líquido, modelado por un sistema generalizado de un grado de libertad.

Fuente: **Malhotra 2000.**

Las respuestas sísmicas del tanque como el cortante basal, el momento de vuelco y el “sloshing” o chapoteo del líquido son calculadas usando el espectro de aceleración que depende del tipo y características del suelo en donde se desee implementar la estructura, así como la altura y el radio de la misma.

Mediante la Tabla 3 elaborada en el método simplificado de Malhotra, se obtienen los valores de masas, coeficientes y alturas requeridas para el cálculo de las reacciones del tanque.

H/r	C _i	C _c (s/√m)	m _i /ml	m _c /ml	h _i /H	h _c /H	h _i '/H	h _c '/H
0,3	9,28	2,09	0,176	0,824	0,400	0,521	2.640	3.414
0,5	7,74	1,74	0,300	0,700	0,400	0,543	1.460	1.517
0,7	6,97	1,60	0,414	0,586	0,401	0,571	1.009	1.011
1,0	6,36	1,52	0,548	0,452	0,419	0,616	0,721	0,785
1,5	6,06	1,48	0,686	0,314	0,439	0,690	0,555	0,734
2,0	6,21	1,48	0,763	0,237	0,448	0,751	0,500	0,764
2,5	6,56	1,48	0,810	0,190	0,452	0,794	0,480	0,796
3,0	7,03	1,48	0,842	0,158	0,453	0,825	0,472	0,825

Tabla 3. Valores recomendados de diseño para los primeros modos de vibración impulsivo y convectivo como función de la relación altura/radio (H/r). Todos los coeficientes están basados en el modelo del sistema tanque-líquido de VELETSOS, A.S. Fuente: **Malhotra 2000**.

Para tanques con espesor de paredes no uniforme este método recomienda que el valor de h sea calculado mediante un promedio ponderado de alturas sobre la altura humedecida por el líquido en la pared del tanque.

La respuesta sísmica del tanque se encuentra representada por medio de las siguientes expresiones. Los periodos de respuesta, impulsivo y convectivo son:

$$T_{con} = C_C \sqrt{r} \quad (2.1)$$

$$T_{imp} = C_i \frac{H \sqrt{p}}{\sqrt{h/r} \cdot \sqrt{E}} \quad (2.2)$$

El cortante basal esta expresado por:

$$Q = (m_i + m_w + m_r) * S_e(T_{imp}) + m_C S_e(T_{con}) \quad (2.3)$$

El momento de vuelco neto encima de la plataforma base está dado por:

$$M = (m_i h_i + m_w h_w + m_r h_r) * S_e(T_{imp}) + m_C h_C S_e(T_{con}) \quad (2.4)$$

El momento de vuelco neto debajo de la plataforma base está dado por:

$$M' = (m_i h_i + m_w h_w + m_r h_r) * S_e(T_{imp}) + m_C h_C' S_e(T_{con}) \quad (2.5)$$

El desplazamiento vertical de la superficie del líquido debido al chapoteo está dado por:

$$d = R \frac{S_e(T_{con})}{g} \quad (2.6)$$

2.5 Normas sísmicas de diseño

2.5.1 Norma Ecuatoriana (NEC SE RE, 2014)

El Ecuador presenta una actividad sísmica alta, a excepción de la parte costera que es considerada muy alta; la norma ecuatoriana NEC2014 divide al país en seis zonas sísmicas con la implementación de un factor Z para cada zona.

El perfil de suelo a analizar se encuentra entre un tipo B y C, de acuerdo con la norma un suelo tipo B es un suelo de roca de rigidez media y un suelo tipo C es un suelo muy denso o que está compuesto por roca blanda.

Para la obtención del espectro sísmico de aceleración se usará el factor sísmico en función de la zona Z , el tipo de suelo, y coeficientes de amplificación de suelo F_a , F_d , F_s . El espectro obedece a una fracción de amortiguamiento respecto al crítico del 5%.

$$S_a = \eta Z F_a \quad \text{para } 0 \leq T \leq T_c \quad \text{donde } T_c = 0,55 F_s \frac{F_d}{F_a} \quad (2.7)$$

$$S_a = \eta Z F_a \left(\frac{T_c}{T} \right)^r \quad \text{para } T > T_c \quad \text{donde } T_L = 2,4 F_d \quad (2.8)$$

η = Razón entre la aceleración espectral S_a ($T = 0,1$ s) y el PGA para el período de retorno seleccionado. Este valor varía dependiendo de la región del Ecuador, adoptando los siguientes valores:

$\eta = 1,80$	Provincias de la Costa (excepto Esmeraldas)
$\eta = 2,48$	Provincias de la Sierra, Esmeraldas y Galápagos
$\eta = 2,60$	Provincias del Oriente

S_a = Espectro de respuesta elástico de aceleraciones (expresado como fracción de la aceleración de la gravedad g). Depende del período modo de vibración de la estructura

T = Período fundamental de vibración de la estructura

T_c = Período límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño

F_a = Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de período corto. Amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de aceleraciones para diseño en roca, considerando los efectos de sitio

F_d = Coeficiente de amplificación de suelo. Amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca, considerando los efectos de sitio

- F_S = Coeficiente de amplificación de suelo. Considera el comportamiento no lineal de los suelos, la degradación del período del sitio que depende de la intensidad y contenido de frecuencia de la excitación sísmica y los desplazamientos relativos del suelo, para los espectros de aceleraciones y desplazamientos
- T_L = Es el período límite de vibración utilizado para la definición de espectro de respuesta en desplazamientos.
- r = Factor en el espectro de diseño elástico.
- $r = 1$ Todos los suelos, menos tipo E.
- $r = 1,5$ Suelo Tipo E.

2.5.2 Eurocódigo (Eurocode8)

Se basa en función del tipo de suelo que se encuentra tabulado, además si la geología del suelo no está representada se recomienda el uso de dos tipos de espectro (Tipo 1 y Tipo 2) normalizados para el 5% de amortiguamiento (B. Standard, 2003). El espectro se obtiene según las siguientes ecuaciones:

$$0 \leq T \leq T_B \quad S_c(T) = a_g \cdot s \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} (\eta \cdot 2,5 - 1) \right] \quad (2.9)$$

$$T_B \leq T \leq T_c: \quad S_c(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \quad (2.10)$$

$$T_c \leq T \leq 5s: \quad S_c(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \frac{T_c}{T} \quad (2.11)$$

Donde los valores de los periodos T_B, T_c, T_d los define:

T = Es el periodo de vibración de un Sistema lineal de un grado de libertad

T_B = Es el límite inferior del periodo del espectro constante de aceleración.

T_c = Es el límite superior del periodo del espectro constante de aceleración

η = Es el factor de corrección de amortiguamiento con un valor de referencia de $\eta = 1$ para un 5% de amortiguamiento. El valor del factor de corrección η será determinado mediante la siguiente expresión:

$$\eta = \sqrt{10 / (5 + \xi)} \geq 0,55 \quad (2.12)$$

a_g = aceleración de diseño de suelo para suelo tipo A.

a_{gR} = pico de referencia en aceleración de suelo tipo A.

$$a_g = \gamma a_{gR} \quad (2.13)$$

γ = Factor de importancia de acuerdo al tipo de estructura.

2.5.3 Norma Mexicana

Esta norma permite calcular el espectro de aceleraciones para un diseño sísmico mediante la utilización de las siguientes formulas (Gobierno del Distrito Federal, 2004):

$$a_0 + (c - a_0) \frac{T}{T_a} \quad \text{si } T < T_a \quad (2.14)$$

$$c \quad \text{si } T_a \leq T < T_b \quad (2.15)$$

$$cp \left(\frac{T_b}{T} \right)^2 \quad \text{si } T \geq T_b \quad (2.16)$$

Donde: $p = k + (1 - k)(T_b / T)^2$

El coeficiente sísmico c , es el cociente de la fuerza cortante horizontal por efecto del sismo V_0 . En donde el coeficiente sísmico c será incrementado un 50 por ciento para estructuras del grupo A, grupo al cual pertenece este tipo de edificación.

El coeficiente de aceleración del terreno a_0 , el coeficiente sísmico c , el coeficiente k y los periodos característicos T_a y T_b del espectro de aceleraciones se obtendrá en función del periodo dominante del sitio, usando las siguientes expresiones:

$$a_0 = 1 + 0,19(T_s - 0,5) \quad \text{si } 0,5 \leq T_s \leq 1,5 \quad (2.17)$$

$$0,25 \quad \text{si } T_s > 1,5s \quad (2.18)$$

$$0,28 + 0,92(T_s - 0,5) \quad \text{si } 0,5 < T_s \leq 1,5s \quad (2.19)$$

$$T_a = \begin{cases} 0,28 + 0,92(T_s - 0,5) & \text{si } 0,5 \leq T_s \leq 1,5s \\ 1,2 & \text{si } 1,5 \leq T_s \leq 2,5s \\ 1,2 - 0,5(T_s - 2,5) & \text{si } 2,5 \leq T_s \leq 3,5s \\ 0,7 & \text{si } T_s > 3,5s \end{cases} \quad (2.20)$$

$$T_b = \begin{cases} 1,35 & \text{si } T_s \leq 1,125s \\ 1,2 T_s & \text{si } 1,125 \leq T_s \leq 3,5s \\ 4,2 & \text{si } T_s > 3,9s \end{cases} \quad (2.21)$$

$$k = \begin{cases} 2 - T_s & \text{si } 0,5 < T_s \leq 1,65s \\ 0,35 & \text{si } T_s \leq 1,65s \end{cases} \quad (2.22)$$

2.5.4 Norma Colombiana – Reglamento de Construcción Sismo Resistente NSR-10

El espectro elástico de aceleraciones S_a se encuentra expresado como función de: la gravedad, de la zona sísmica en la que se ubique la edificación, además del tipo de suelo sobre el que se ha construido (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, 2010). Este espectro ha sido formulado para un coeficiente de 5% del amortiguamiento crítico e incluye un factor de importancia I , de acuerdo al tipo de estructura que se desee construir. Se lo calcula utilizando las siguientes ecuaciones:

$$S_a = 2,5A_a F_a I \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \quad \text{si } 0 \leq T \leq T_0 \quad \text{donde } T_0 = 0,1 \frac{A_v F_v}{A_a F_a} \quad (2.23)$$

$$S_a = 2,5A_a F_a I \quad \text{si } T_0 \leq T \leq T_c \quad \text{donde } T_c = 0,48 \frac{A_v F_v}{A_a F_a} \quad (2.24)$$

$$S_a = \frac{1,2A_v F_v T_L I}{T^2} \quad \text{si } T_c \leq T \leq T_L \quad \text{donde } T_L = 2,4F_v \quad (2.25)$$

$$S_a = \frac{1,2A_v F_v T_L I}{T^2} \quad \text{si } T > T_L \quad (2.26)$$

2.5.5 Espectros de aceleraciones con distinto amortiguamiento

Las normas mencionadas anteriormente han sido elaboradas para estructuras que tengan un amortiguamiento del 5%, que se presenta cuando la construcción ha sido realizada en hormigón. Por lo que es necesario obtener un espectro de aceleraciones para un amortiguamiento del 2% que se utilizara para la masa del líquido considerada como impulsiva, de igual manera se debe determinar el espectro de aceleraciones para un amortiguamiento del 0,5% que será utilizado para el resto de la masa del líquido llamada masa convectiva.

Mediante la fórmula de velocidad dada por Newmark (Newmark & Hall, 1982) y a partir de un espectro de aceleraciones con un amortiguamiento conocido se puede obtener un espectro de aceleraciones con un distinto amortiguamiento. La ecuación 2.27 nos permite realizar este cambio. Esta ecuación es también usada por el programa SAP2000, cuando se necesita cambiar un espectro de aceleraciones.



$$A2 = A1 * \frac{(2,31 - 0,41 * \ln D2)}{(2,31 - 0,41 * \ln D1)} \quad (2.27)$$

Dónde: $A1$ = aceleración correspondiente al coeficiente de amortiguamiento $D1$.

$A2$ = aceleración correspondiente al coeficiente de amortiguamiento $D2$.

Los valores de $D1$ y $D2$ corresponden a los valores de amortiguamiento de los espectros, expresados en porcentaje.

2.5.6 Caracterización de los Espectros de Diseño

Se determinan los valores de las distintas variables necesarias para la obtención del espectro correspondiente para cada norma, buscando que las condiciones asignadas a cada espectro representen una similitud con las condiciones que se encuentran en la región Costa en el Ecuador con relación al tipo de suelo y peligro sísmico que presenta la zona de estudio.

NEC

Factor zona sísmica VI; $Z \geq 0,50$

Suelo tipo C: Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o que cumplan con los dos criterios.

$760 \text{ m/s} > V_s \geq 360 \text{ m/s}$ $N \geq 50$

$r = 1$

$\eta = 2,48$

EUROCODIGO

Suelo tipo B: $360 - 800$ $N \geq 50$

Tipo 1

Factor de importancia $\gamma = 1,25$

$\eta = 5\%$

$a_{gR} = 0,45$

COLOMBIA

Grupo IV

Coeficiente de importancia $I = 1,5$

Suelo tipo C: $760 \text{ m/s} > V_s \geq 360 \text{ m/s}$ $N \geq 50$

Región 9: $A_a = 0,45$ $A_v = 0,45$

MEXICO

Tipo de estructura A
Factor de importancia $c=1,5$
Zona 2
 $T_s = 0,95$

Según lo especificado en 2.5.5; se obtiene los espectros correspondientes según las normas mencionadas, cuyas graficas se presentan a continuación:

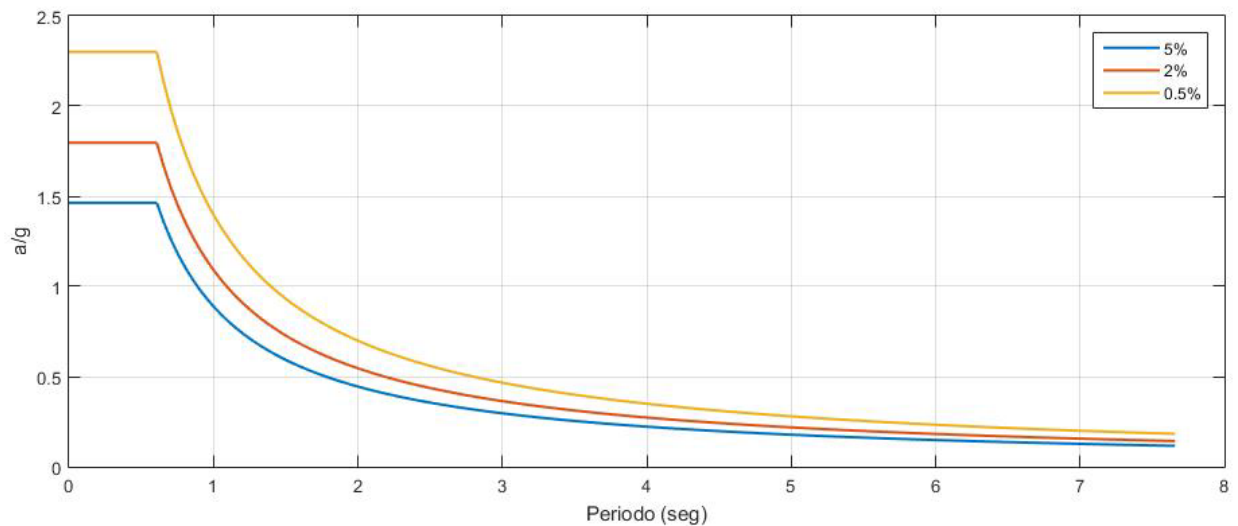


Figura 6. Espectro de aceleraciones obtenido según la norma NEC

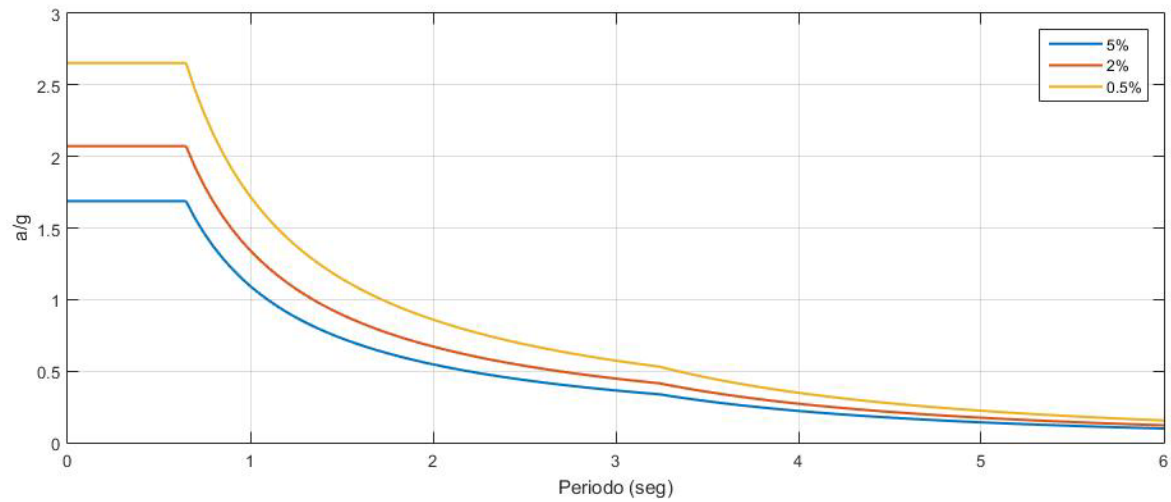


Figura 7. Espectro de aceleraciones obtenido según la norma Colombiana

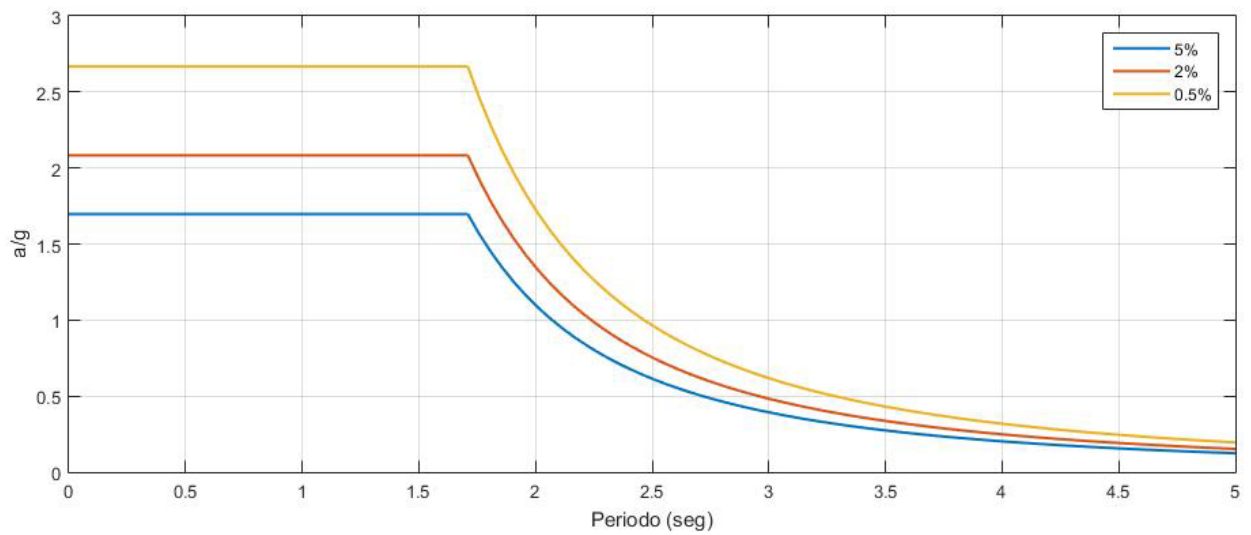


Figura 8. Espectro de aceleraciones obtenido según la norma Mexicana

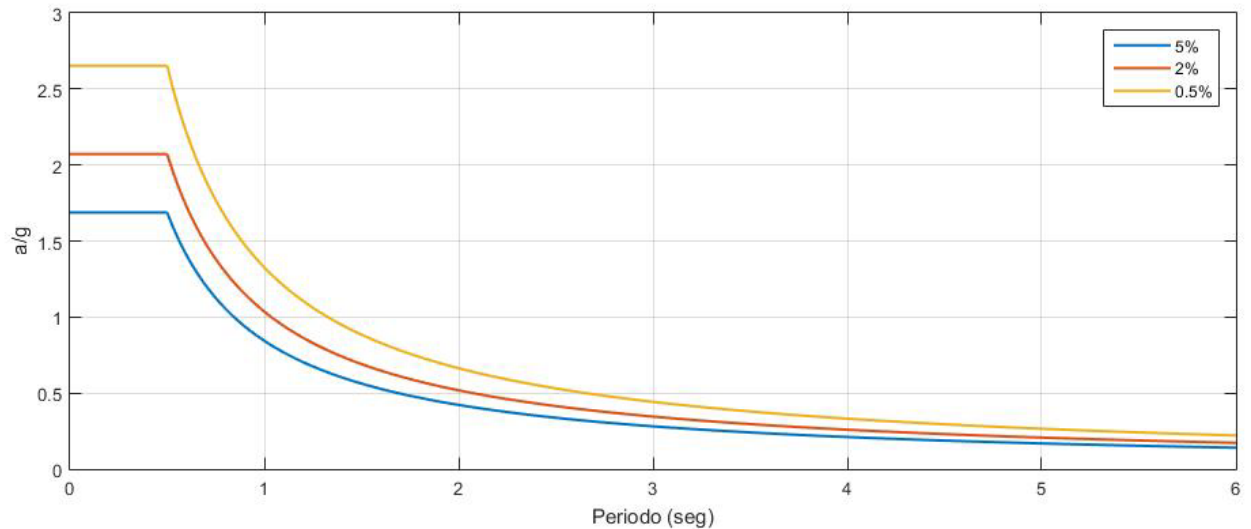


Figura 9. Espectro de aceleraciones obtenido según el Eurocodigo

2.6 Desarrollo de los modelos computacionales

2.6.1 Modelo Dinámico Equivalente

Se puede elaborar un modelo dinámico bidimensional definido a partir de dos barras que simulan el comportamiento del líquido tanto impulsivo en el que se encuentra añadida la masa de las paredes y el techo del tanque, y del líquido convectivo; para lo cual es necesario conocer los valores de masas, rigidez y alturas obtenidas según el método simplificado de Malhotra.

Según este método simplificado, en el programa Sap2000 se representan mediante elementos frame que se encuentran anclados a la base mediante un empotramiento, su rigidez se obtiene de la rigidez a flexión de una barra definida en la formula (2.28) y se representa como se indica según la Figura 10.

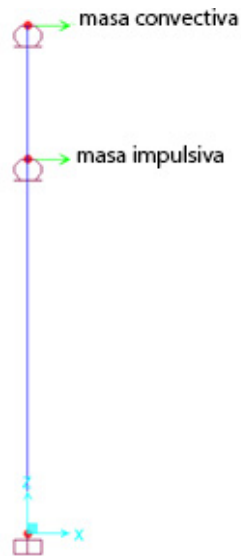


Figura 10. Modelo dinámico equivalente en Sap2000.

$$K = \frac{3EA}{L^3} \quad (2.28)$$

Una vez ingresados los valores de la masa impulsiva junto con la masa del tanque y de la masa convectiva del líquido al final de cada barra se pueden obtener los periodos y modos de vibración naturales del modelo, esto se muestra en la figura 11.

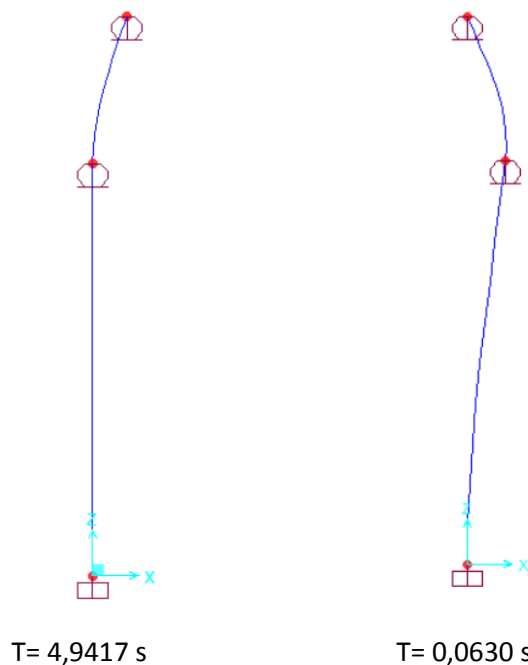


Figura 11. Modos 1 y 3 de vibración del modelo dinámico equivalente del Tanque 1

Los modos de vibrar de las masas impulsivas y convectiva es diferente, razón por la cual se puede realizar el análisis dinámico por separado de cada una de las masas, y es la razón por la que los métodos simplificados que existen realizan esa división.

2.6.2 Modelo de Elementos Finitos - SAP2000

Para la elaboración del modelo se ha usado elementos Shell, los cuales son elementos área, que sirven para simular comportamientos de cascara, placa y membrana en estructuras planas y tridimensionales como es el caso de los tanques de este estudio (Hernández, 2007). Para la elaboración de los modelos computacionales se debe determinar los valores de las masas, impulsiva y convectiva del líquido. Mediante el análisis de un modelo dinámico de un grado de libertad, para la componente impulsiva y convectiva por separado como lo plantea el método simplificado de Malhotra se determinan las rigideces necesarias para la modelación a partir de:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.29)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.30)$$

2.6.2.1 Componente Convectiva

El valor de esta masa es obtenida mediante el método simplificado, se introduce este valor de masa al programa computacional adherida al tanque mediante elementos frame que son los que simulan la rigidez de la masa convectiva del agua; este valor ha sido asignado en dos direcciones perpendiculares entre ellas.

A partir de la ecuación (2.29), se puede obtener la rigidez de los elementos frame que simulan la masa convectiva. Una vez conocido el periodo se obtiene la frecuencia angular mediante la ecuación (2.30); y a partir de esta se determina el valor de la rigidez convectiva.

Para asignar a cada elemento frame la rigidez necesaria para simular el oleaje en las paredes del tanque inducido por la porción del líquido considerado como masa convectiva se utiliza la ecuación de la rigidez axial de una barra, dada por:

$$K = \frac{EA}{L} \quad (2.31)$$

De la ecuación (2.31) se puede obtener el área que es lo único desconocido hasta el momento. Se ha optado por usar 24 barras, espaciadas radialmente en un ángulo equitativo de 15 grados, por lo cual se considera solo 12 barras pues al ser una rigidez axial en cada dirección trabajan la mitad de las barras asignadas, teniendo como resultado la ecuación para calcular el área necesaria en cada elemento igual a:

$$A = \frac{KL}{E \left(\frac{n}{2} \right)} \quad (2.32)$$

Donde:

n es el número de barras que conectan la masa convectiva con el tanque.

2.6.2.2 Componente Impulsiva

Al ser un tanque metálico se debe tener en cuenta la flexibilidad de las paredes del mismo, por lo que debe ser considerada una componente impulsiva de presión adicional, esta presión es debido a la vibración del fluido del tanque resulta debido a un número infinito de modos de vibración del tanque. Diferentes formulaciones de esta consideración han sido propuestas por varios investigadores como (Haroun & Housner 1981, Veletsos & Yang 1977), y han sido publicados en códigos internacionales de diseño. (Di Carluccio, Fabbrocino, & Manfredi, 2008).

Esta masa la obtenemos a partir del método simplificado de Veletsos y Yang, la variación temporal de la componente de la presión impulsiva es la misma que la aceleración del suelo, razón por la cual esta componente de presión debe ser considerada como una masa rígida adherida a la pared del tanque.

La componente impulsiva de la presión hidrodinámica $P_i = P_i(r, \theta, z, t)$, está determinada por la ecuación:

$$P_i = C_0(r, z) \rho_l R \ddot{x}(t) \cos \theta \quad (2.33)$$

Si $u_0(z)$ es la magnitud virtual de la masa del líquido por unidad de altura, y su fuerza de inercia asociada $u_0(z) \ddot{x}(t)$, se puede simplificar ésta relacionándola con la presión hidrodinámica mediante:

$$u_0(z)\ddot{x}(t) = \int_0^{2\pi} P_i(z, \theta, t) R \cos \theta d\theta \quad (2.34)$$

Integrando y eliminando términos comunes se tiene:

$$u_0(z) = C_0(z) \pi R^2 \rho_l \quad (2.35)$$

Donde la distribución de $u_0(z)$ es la misma que la de $C_0(z)$. Y el valor de $C_0(z) = 1$ significa que el volumen total del líquido por unidad de altura actúa como una masa rígida con el tanque. El valor de $C_0(z)$ esta dado por la ecuación:

$$C_0(r, z) = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{H}{R} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)^2} \cdot \frac{I_1 \left[(2n-1) \frac{\pi r}{2H} \right]}{I_1' \left[(2n-1) \frac{\pi R}{2H} \right]} \cos \left[(2n-1) \frac{\pi z}{2H} \right] \quad (2.36)$$

I_1 es la formula modificada de Bessel de primera clase, y I_1' su primera derivada

La figura 12 muestra los valores de $C_0(z)$ para las diferentes relaciones de H/r a usarse.

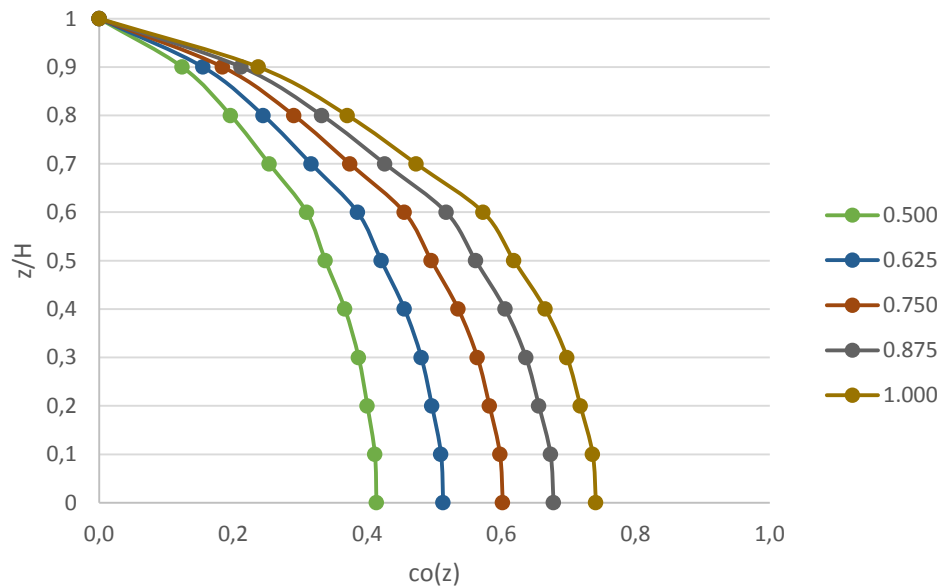


Figura 12. Valores de $C_0(z)$

Para el modelo de elementos finitos se consideró una división uniforme de los tanques en z (altura) equitativamente distanciada con un valor de 0,5 m. En cada

división de la altura del tanque se ha asignado una masa que ha sido calculada mediante el método descrito en Veletsos y Yang.

En la figura 13 se muestran ejemplos de la representación realizada en el modelo de SAP2000.

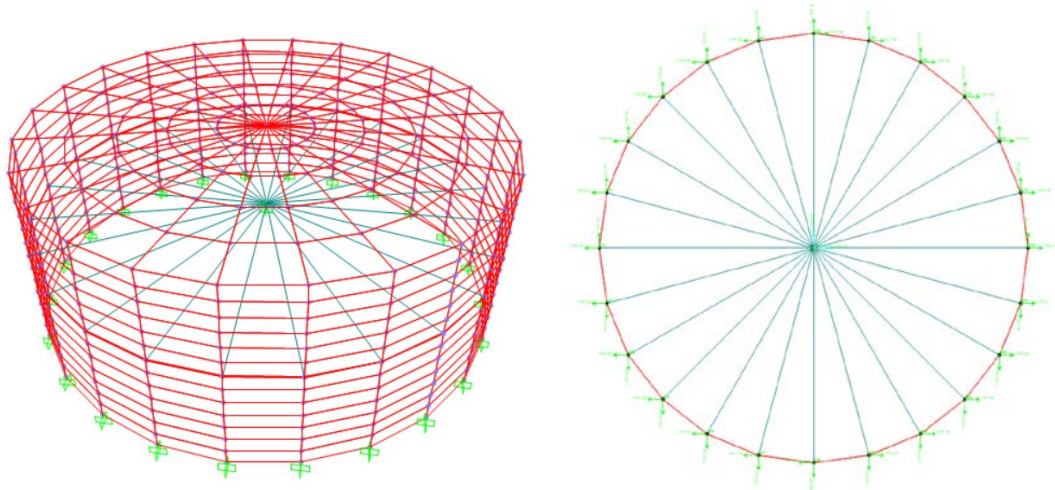


Figura 13 Elementos frame y Shell usados para la modelización del tanque en el programa SAP2000

3. CAPITULO III – ANALISIS DE RESULTADOS

Este capítulo muestra el análisis empleado y sus consecuentes resultados, del método simplificado y numérico mencionado, se analizan y compara valores.

3.1 Periodos de vibración

En el programa de elementos finitos SAP2000, se obtienen los factores de participación modal (FPM), de donde se pueden obtener los principales modos de vibración de la estructura. Para cada tanque se ha asignado, un número de modos de vibración de tal manera que se alcance un 95% de participación acumulada de la masa en el proceso de cálculo. En la tabla 4 se muestran los modos de vibración que tienen un porcentaje de participación de la masa considerable, correspondientes al Tanque 1. Los valores obtenidos para los otros tanques se pueden observar en el Anexo A.

TANQUE 1 - FACTOR DE PARTICIPACION MODAL DE LA MASA					
MODO	Periodo (s)	FPM Eje X	FPM Eje Y	FPM Acumulado Eje X	FPM Acumulado Eje Y
1	4,9276	0,0098	0,6740	0,010	0,674
2	4,9276	0,6740	0,0098	0,684	0,684
37	0,0455	0,0310	0,0550	0,732	0,757
38	0,0455	0,0550	0,0310	0,787	0,787
50	0,0429	0,0260	0,0330	0,814	0,820
51	0,0429	0,0330	0,0260	0,847	0,847
65	0,0392	0,0014	0,0190	0,848	0,866
66	0,0392	0,0190	0,0014	0,867	0,867
84	0,0324	0,0062	0,0057	0,873	0,873
85	0,0324	0,0057	0,0062	0,879	0,879
137	0,0232	0,0240	0,0310	0,905	0,911
138	0,0232	0,0310	0,0240	0,936	0,936
161	0,0193	0,0071	0,0070	0,943	0,943
162	0,0193	0,0070	0,0071	0,950	0,950
193	0,0129	0,0071	0,0074	0,957	0,957
194	0,0129	0,0074	0,0071	0,964	0,964

Tabla 4. FPM Tanque 1

Los dos primeros modos de vibración constituyen al efecto convectivo de la masa del líquido, con la diferencia que el desplazamiento de la masa en el modo 2 es en forma perpendicular al primer modo como se observa en la figura 14.

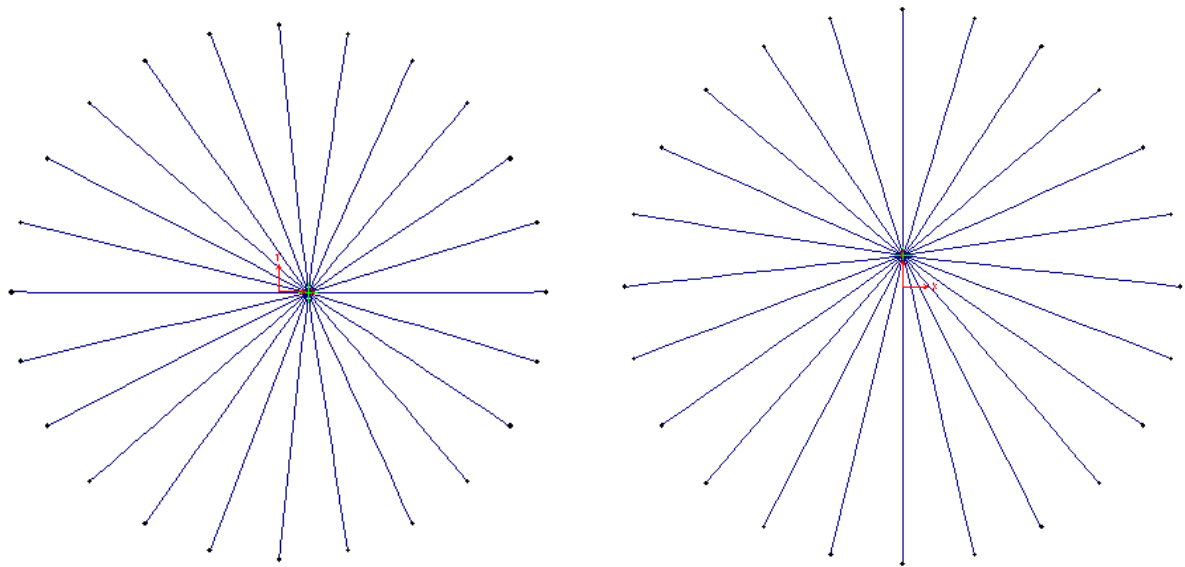


Figura 14. Deformada de los modos 1 y 2 del Tanque 1.

El modo 1 posee un FPM del 67% en la dirección X y un 0,9% en la dirección Y ocasionando un movimiento de la masa en la dirección X, mientras que el segundo modo con los mismos valores de FPM tiene su efecto en la dirección Y como se observa en la parte derecha de la figura 14.

Para el efecto de la masa impulsiva se deben considerar los modos 37 y 38 cuyo efecto es el mismo solo que en dirección perpendicular, los cuales poseen FPM del 3% en una dirección y del 5% en la otra.

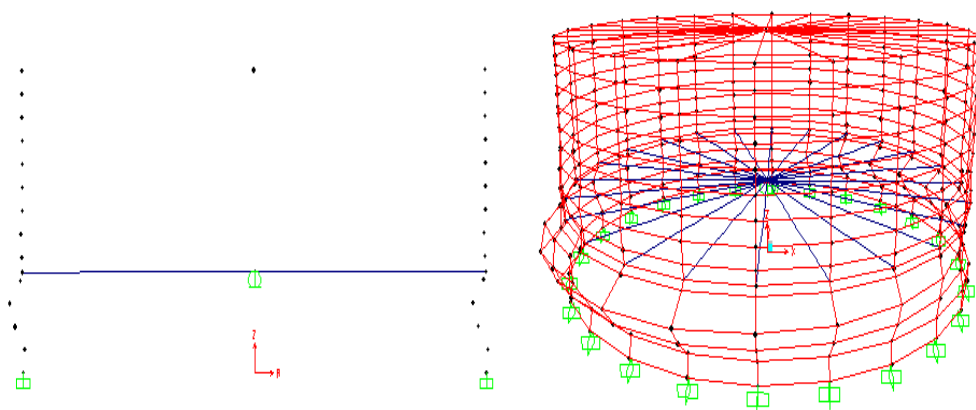


Figura 15. Deformada de los modos 37 y 38 para el Tanque 1.

La figura 15 muestra las deformaciones provocadas al tanque por el modo 37; para el caso del modo 38 se trata de la misma deformada solo que en dirección perpendicular a la que se muestra en la figura. Se observa que el efecto de estos modos de vibración se da en las paredes del tanque, donde se tiene una deformación considerable mientras que la masa convectiva no muestra ningún movimiento.

En la figura 14 la deformada nos muestra que el desplazamiento se produce en la masa convectiva del tanque mientras que las paredes no muestran deformaciones. Lo contrario se da en la figura 15 donde las paredes se deforman mientras que la masa convectiva se mantiene en su posición por lo cual se puede aceptar que estos modos de vibración escogidos de los FPM representan adecuadamente el movimiento impulsivo y convectivo de la masa del líquido.

Este análisis es realizado para cada tanque, seleccionando los modos de vibrar que representen adecuadamente el modo impulsivo y convectivo de cada uno.

Tanque	Impulsivo		Convectivo	
	Malhotra	SAP2000	Malhotra	SAP2000
1	0,0587	0,0455	4,9215	4,9276
2	0,0689	0,0529	4,6740	4,6821
3	0,0782	0,0694	4,4878	4,4974
4	0,0878	0,0693	4,3935	4,4028
5	0,0965	0,0847	4,2992	4,3092

Tabla 5. Valores de periodos según el análisis computacional y el método simplificado.

En la Tabla 5 se puede observar la cercanía que tiene tanto el periodo impulsivo como convectivo del modelo computacional con el modelo simplificado de Malhotra. Se presenta una variación máxima del 20% en los periodos impulsivos esto se debe a que al tener magnitudes pequeñas una ligera variación en el valor repercute en el porcentaje de variación total, mientras que en el caso de los periodos convectivos la variación máxima es del 0,23%.

3.2 Cortante, Momento y Altura de ola.

Posterior a esto es necesario ingresar los espectros de diseño mostrados anteriormente para cada norma en el programa SAP2000, donde se designa para los modos convectivos un espectro con un 0,5% de amortiguamiento y para los modos impulsivos un amortiguamiento del 2%. Se asigna una carga de sismo en una dirección y el 30% de esta carga en la dirección perpendicular como indica la norma NEC.

Para el análisis comparativo entre las normas, se emplea una combinación por última resistencia descrita en la NEC para la obtención de las reacciones en los modelos realizados en SAP2000. Se ha optado por la combinación 7 localizada en la sección de cargas no sísmicas, la cual consiste en:

$$0,9D + 1,0E \quad (3.1)$$

D = carga permanente o muerta.

E = carga de sismo.

Luego de esto se pueden obtener los valores de cortante y momento para los modelos bidimensional y tridimensional, los cuales serán comparados con los valores obtenidos a partir del método simplificado de Malhotra.

3.2.1 Cortante

Las figuras 16 a 19 muestran los valores de cortante de los modelos, junto los resultados del método simplificado para los tanques a analizar en este estudio.

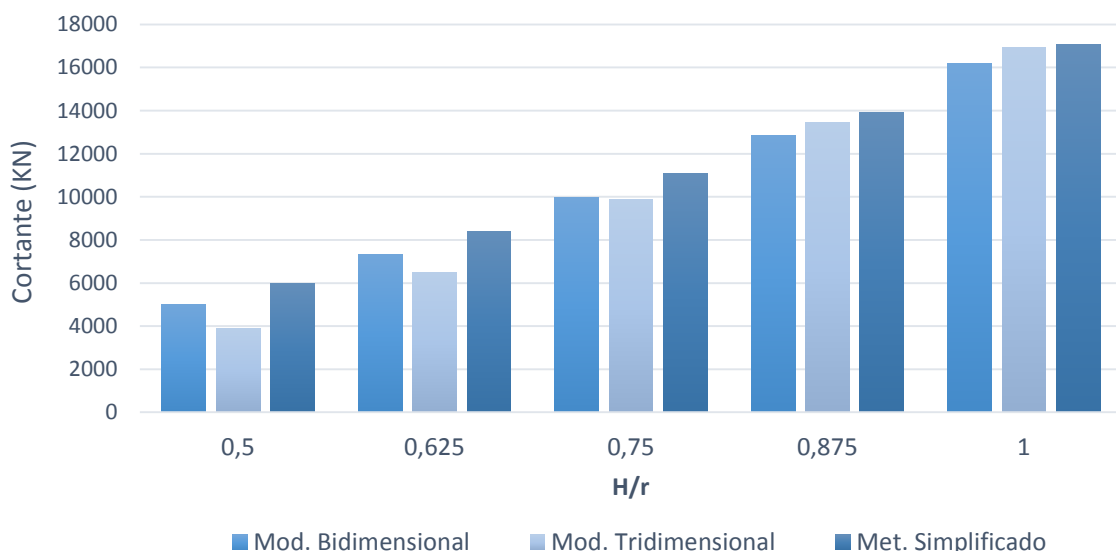


Figura 16. Cortante para las relaciones de H/r usando el espectro de la norma NEC

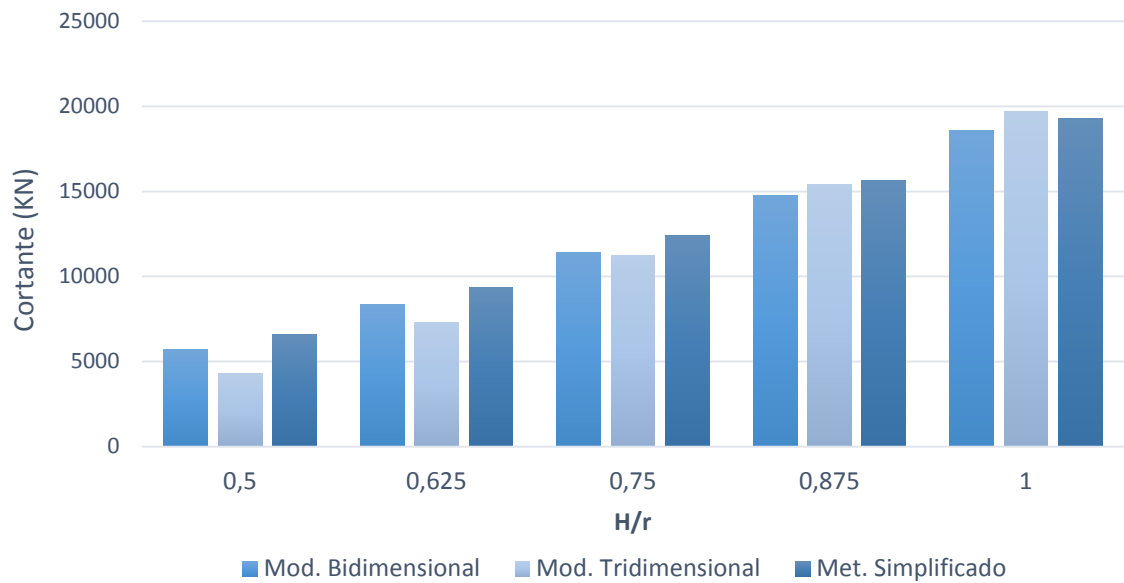


Figura 17. Cortante para las relaciones de H/r usando el espectro según el Eurocodigo

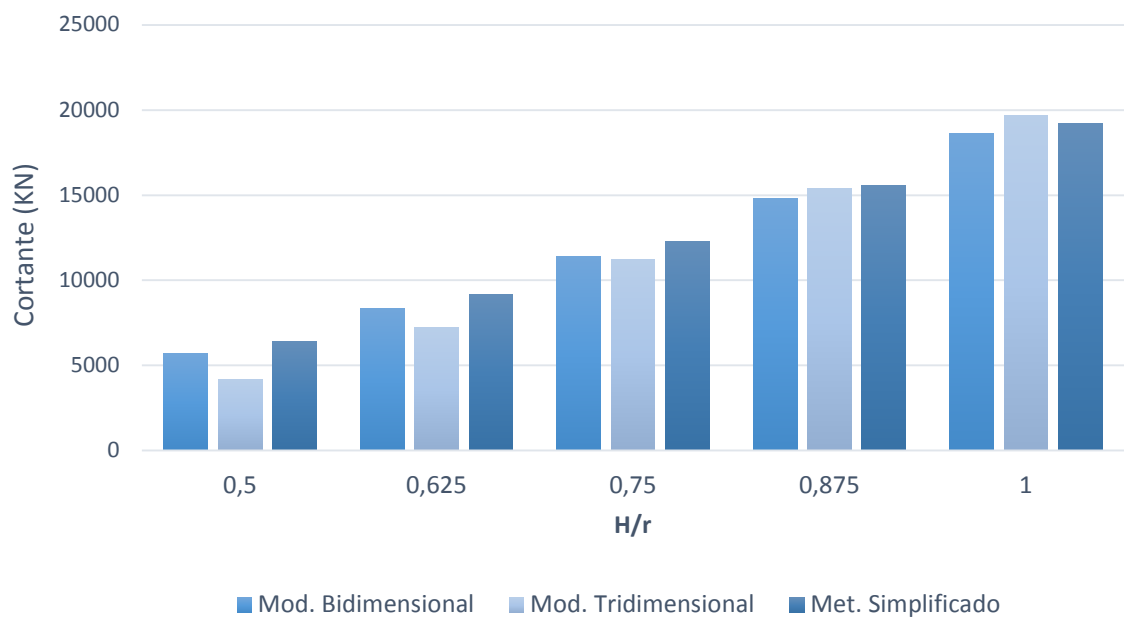


Figura 18. Cortante para las relaciones de H/r usando el espectro de la norma Colombiana

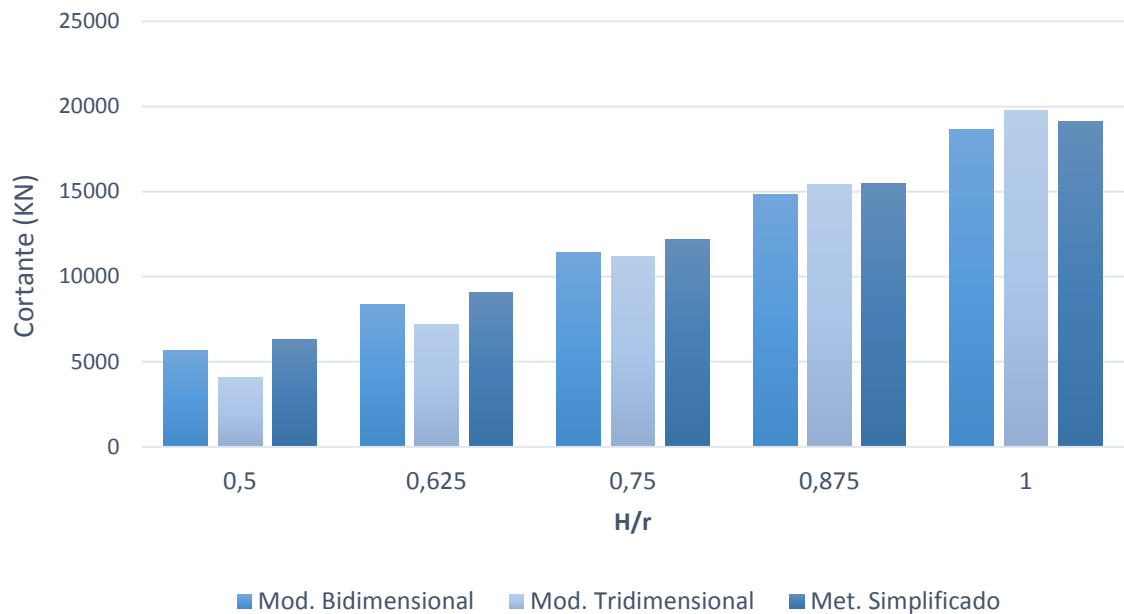


Figura 19. Cortante para las relaciones de H/r usando el espectro de la norma Mexicana

Los valores obtenidos mediante los modelos computacionales y el método simplificado tienen una similitud en todas las relaciones de H/r, así como para todas las normas utilizadas. El modelo tridimensional muestra valores menores con relaciones bajas de H/r, pero a medida que la relación aumenta su valor crece rápidamente, es así que con relaciones de H/r cercanas a 1, este valor presenta una ligera variación con respecto al valor del método simplificado. Por lo cual se tomarán los valores del método simplificado para realizar una comparación de los valores obtenidos con las normas utilizadas en este estudio.

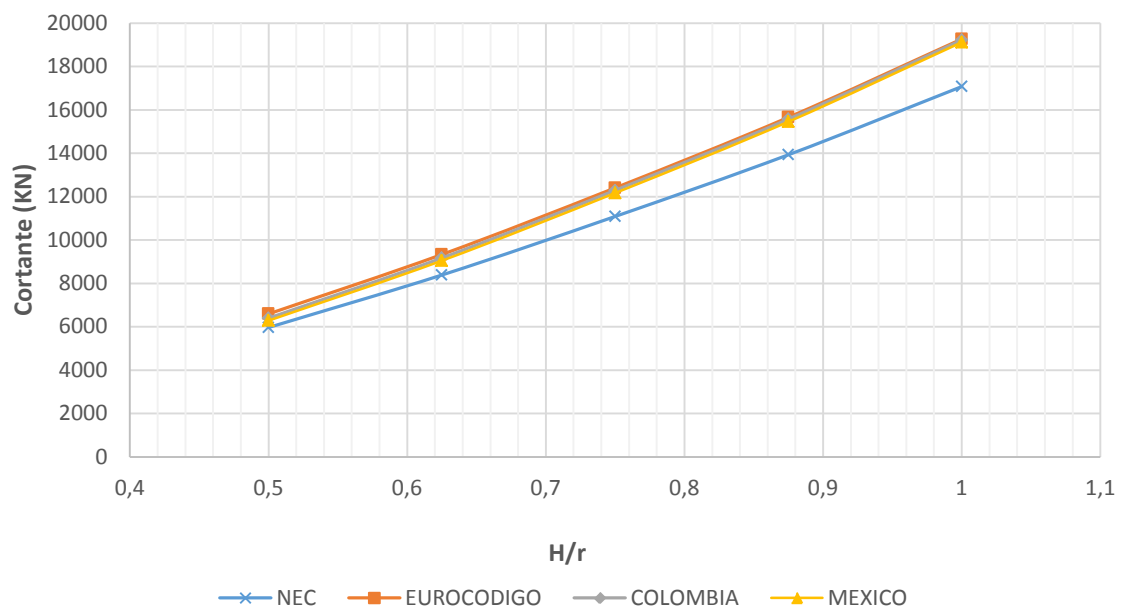


Figura 20. Valores de Cortante de las normas de estudio para diferentes relaciones de H/r

En la figura 20 se observa que los valores de cortante presentan una tendencia similar mientras se da un incremento en la relación H/r . El Eurocodigo junto con las normas Mexicana y Colombiana tienen valores algo mayores a la NEC, esto se debe a que el espectro de aceleraciones que se usó para el cálculo de las reacciones en el caso de la NEC es menor al que se obtuvo para las otras normas.

3.2.2 Momento de Vuelco

En las figuras 21 a 24, se muestran los valores del momento de vuelco de los modelos computacionales, además de los resultados del método simplificado para los tanques de estudio.

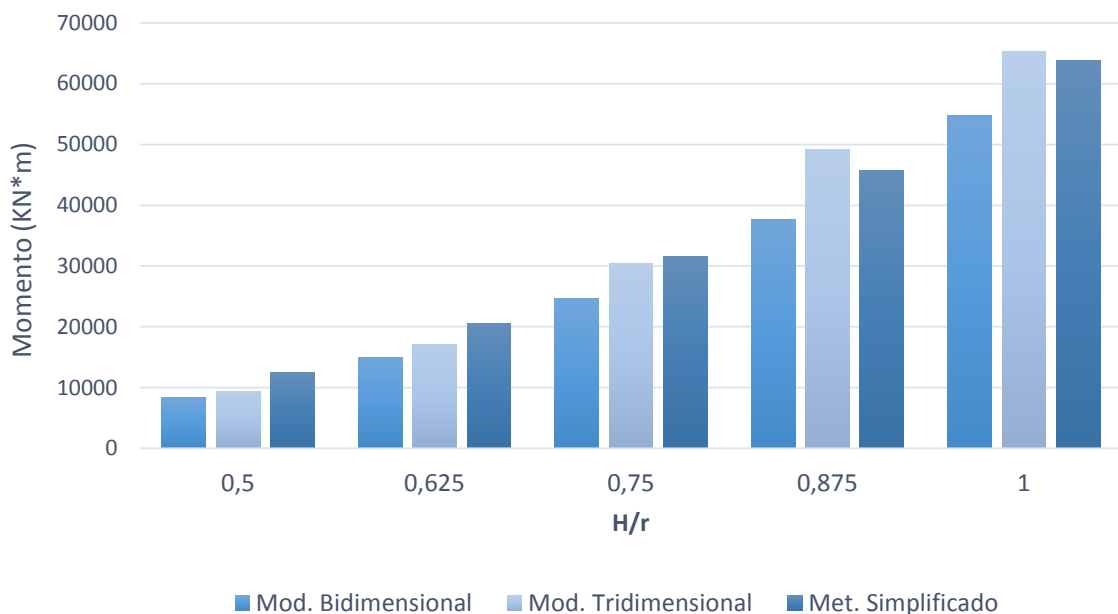


Figura 21. Momento para las relaciones de H/r usando el espectro de la norma NEC

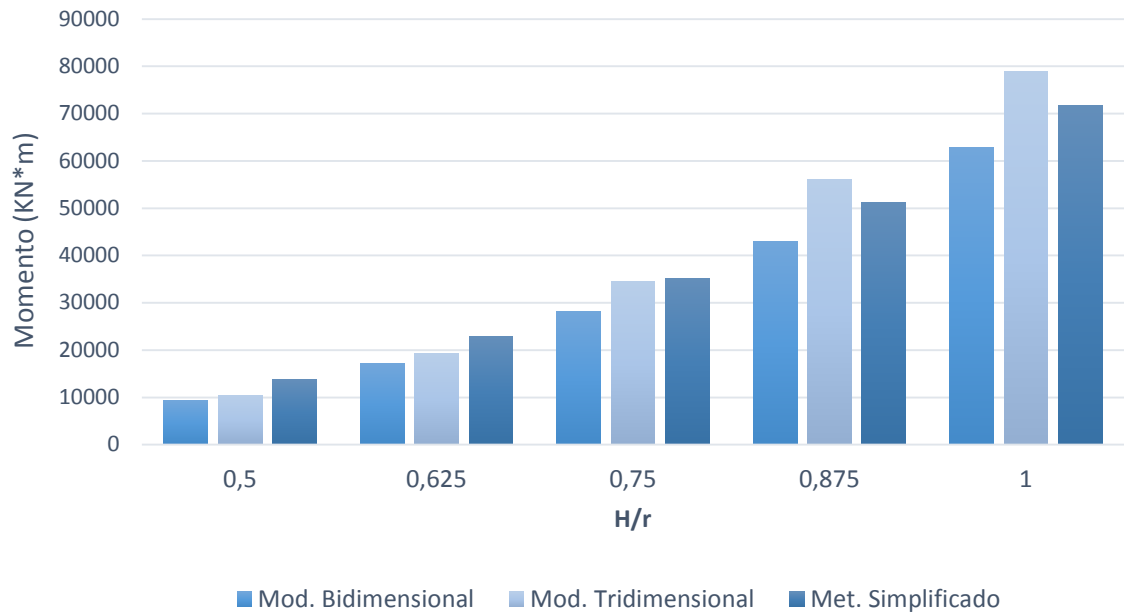


Figura 22. Momento para las relaciones de H/r usando el espectro del Eurocodigo

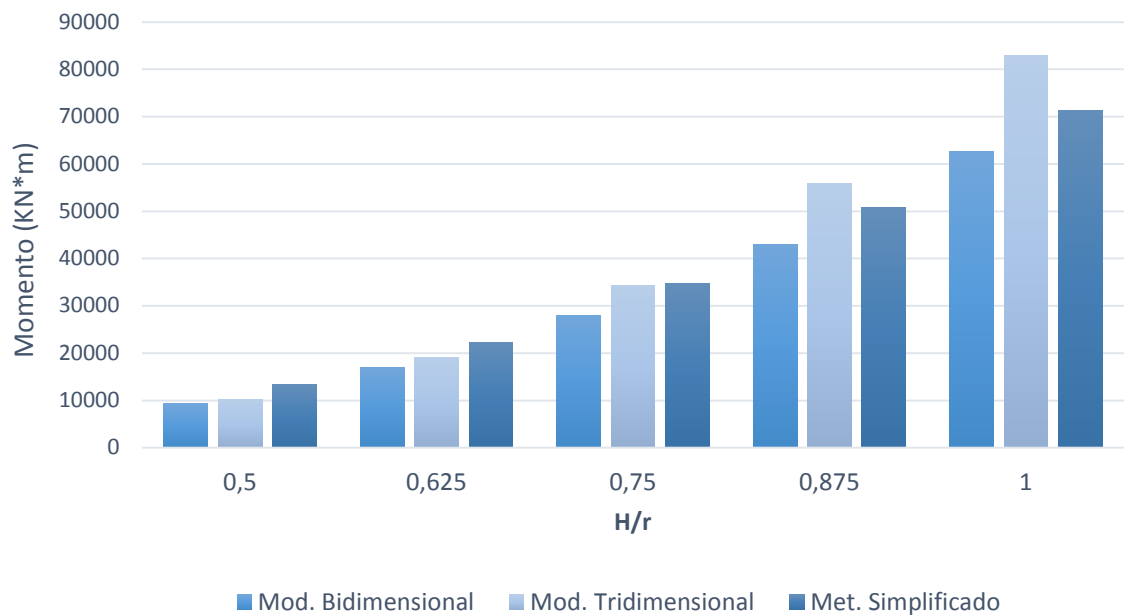


Figura 23. Momento para las relaciones de H/r usando el espectro de la norma Colombiana

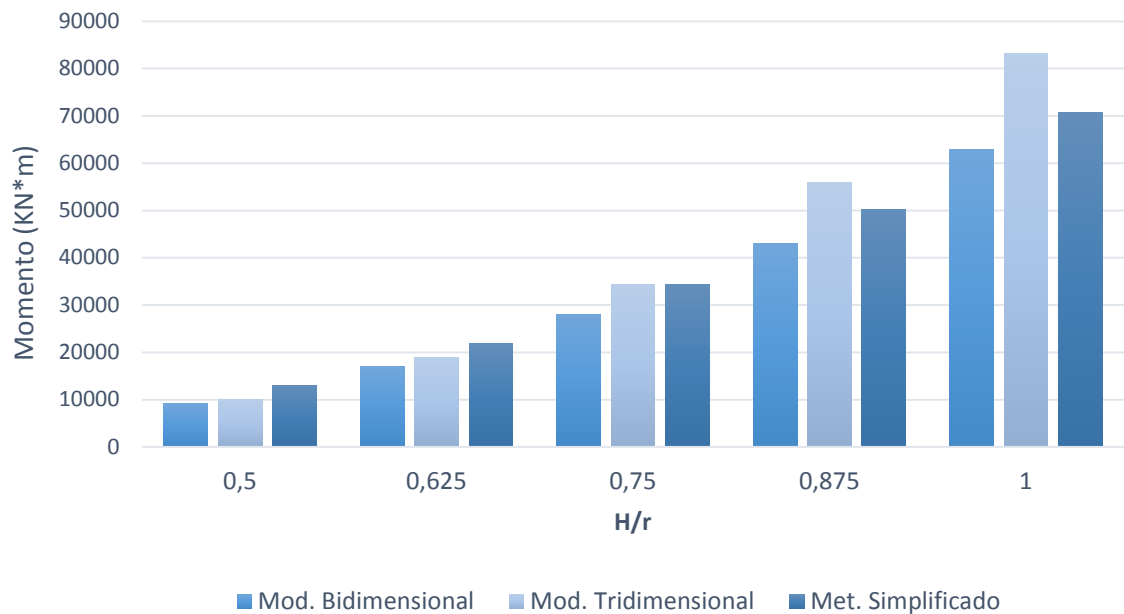


Figura 24. Momento para las relaciones de H/r usando el espectro de la norma Mexicana

Para relaciones bajas de H/r, el caso de los tanques 1 y 2 los valores obtenidos tienen muy poca variación, pero a medida que la relación se acerca a 1 como se da en los tanques 4 y 5, el valor del modelo tridimensional muestra un incremento con respecto a los valores del modelo bidimensional y del método simplificado. De igual manera se utilizarán los valores del método simplificado para mostrar la variación que se presenta entre las normas de estudio.

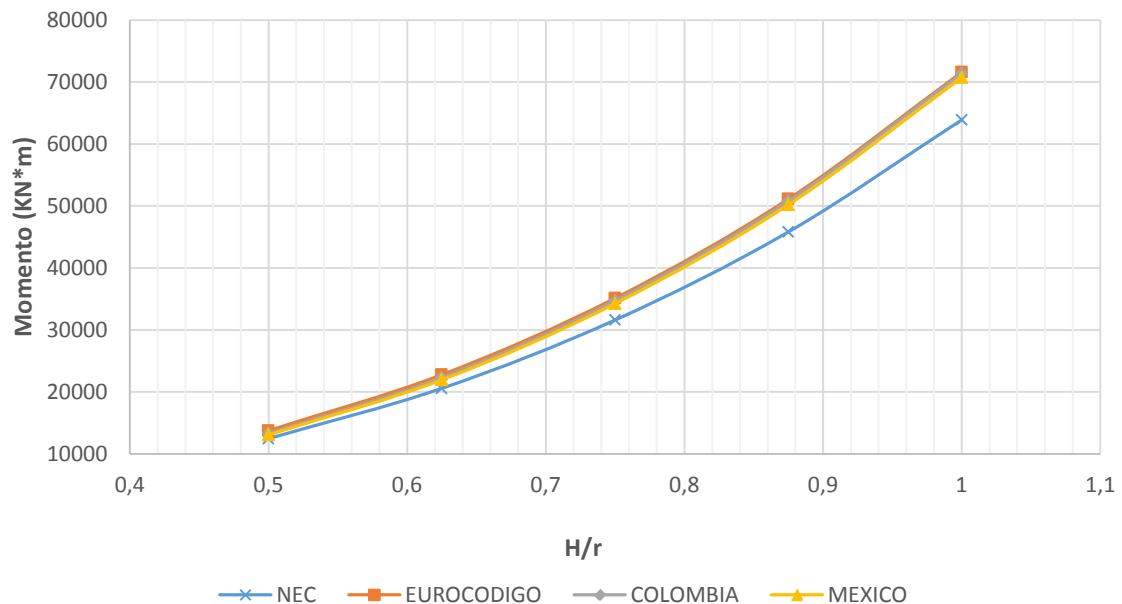


Figura 25. Valores del Momento de Vuelco de las normas de estudio para diferentes relaciones de H/r

La figura 25 muestra que mientras la relación H/r aumenta, los valores de momento tienen una mayor pendiente por lo cual aumentan con rapidez. Al igual que en el caso del cortante los valores obtenidos usando el espectro de la NEC son algo menores que los valores de las normas Colombiana y Mexicana así como del Eurocodigo.

3.2.3 Altura de Ola

Al momento de presentarse un sismo se provoca un movimiento en la parte superior del líquido almacenado conocido como “chapoteo”, ocasionándose un oleaje que puede ocasionar falla en la parte superior de las paredes del tanque. La figura 26 muestra los valores de la altura de ola obtenido para las normas de estudio según la (ecuación 2.6) del método simplificado, no se ha podido comparar con los resultados del modelo computacional debido a que este resultado no puede ser obtenido.

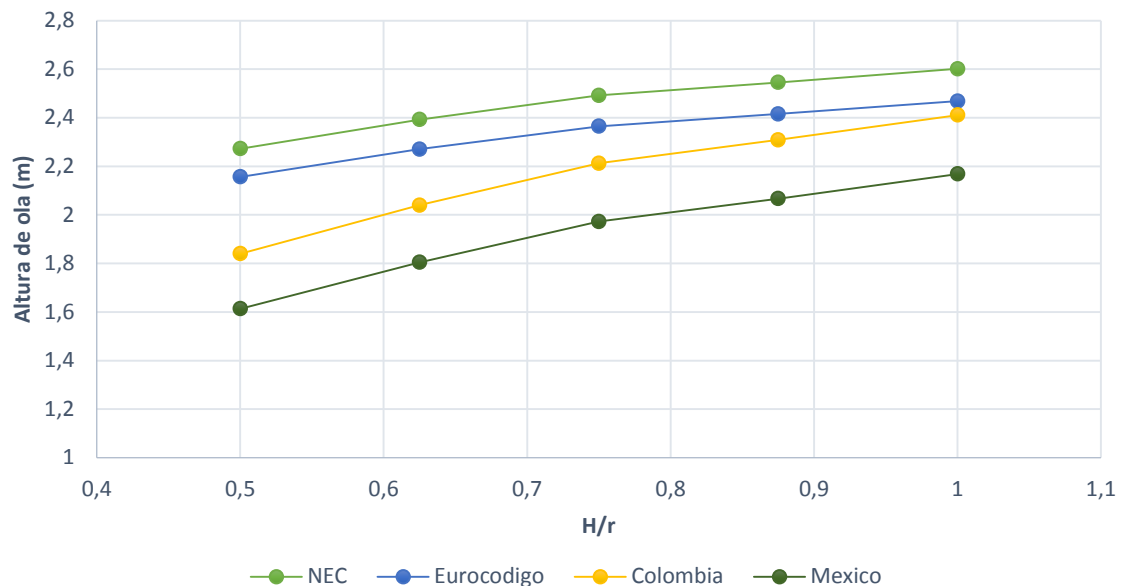


Figura 26. Valores de Altura de Ola de las normas de estudio para diferentes relaciones de H/r

Los valores obtenidos con el uso de las diferentes normas presentan una cierta variación para relaciones de H/r bajas, pero cuando esta aumenta los valores tienden a tener una mayor similitud. Se observa en todas las normas que la pendiente con la que crecen las curvas es pequeña, por lo cual un aumento en la relación H/r no incita grandes cambios en la magnitud de esta cantidad.

4. CAPITULO IV – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo presenta una comparación de un modelo dinámico simplificado donde el comportamiento del líquido se simula mediante sistemas masa-resorte como es el caso del método de Malhotra, con un modelo de elementos finitos elaborado el programa SAP2000. Para el cálculo de las reacciones del tanque ante un evento sísmico se han usado espectros de aceleraciones especificados en las normas Ecuatoriana, Colombia, Mexicana y en el Eurocodigo. Con base a las comparaciones realizadas se puede concluir:

- Los periodos de vibración obtenidos del método simplificado y del modelo computacional muestran variaciones aceptables, en el caso de los modos impulsivos presentan variaciones máximas del 20%, por otro lado los periodos correspondientes a los modos convectivos tienen una variación máxima del 0,23%.
- Al analizar los FPM se observa que a medida que crece la relación de esbeltez H/r , la porción del líquido que tiene un mayor porcentaje de participación que corresponde a la masa impulsiva; mientras que la masa convectiva tiene mayor participación cuando se tienen relaciones menores. Lo que sucede de igual manera en la asignación de los porcentajes de masa de acuerdo a H/r en el método simplificado.
- Las magnitudes de las reacciones en la base están muy influenciados por la relación H/r , pues cuando esta aumenta los valores de las resultantes obtenidos de las 4 normas aumentan con una mayor pendiente. Algo diferente a lo que se da con la altura de ola, pues esta presenta leves aumentos en su valor ante una variación de su esbeltez.
- Los valores de cortante y momento obtenidos con la norma Colombiana, Mexicana y con el Eurocodigo son mayores a los valores de la NEC en todas las relaciones de esbeltez analizadas. Esto se debe a que el espectro de aceleraciones de la NEC presenta valores menores a los espectros utilizados en las otras normas, principalmente a que en las otras normas el espectro es incrementado por un factor de importancia que se asigna a este tipo de estructuras. En cuanto a la altura de ola los valores dados por la NEC son mayores a los de las otras normas por lo cual presentan una mayor seguridad y tiene una semejanza con los valores dados por el Eurocodigo.
- El método computacional empleado en este estudio presenta algunas limitaciones en cuanto al análisis de la interacción que se da entre el fluido y la estructura, por lo cual si se desea tener una mejor aproximación en cuanto a los modos convectivos que presentan el oleaje en el líquido es necesario utilizar otros programas que representen al líquido como elementos tridimensionales.



La norma ecuatoriana de la construcción dentro del alcance de la misma, especifica que para diseño de estructuras como tanques se recomienda el uso de normas internacionales, en este estudio se utilizó el método de Malhotra y para la modelación en el programa se ha optado por utilizar ecuaciones desarrolladas por Veletsos para una mejor distribución de la masa impulsiva. Los resultados muestran la validez del método simplificado empleado para el análisis, siendo este método conservativo para las relaciones bajas. El cortante basal y momento obtenido mediante los tres métodos de análisis: bidimensional, tridimensional y el método de Malhotra, presentan una aceptable variación, demostrando la eficacia del método simplificado al ser un forma sencilla y rápida de evaluar a un tanque, por lo cual se recomienda usar este método para un procedimiento de pre diseño y análisis de fuerzas externas.

El uso de estas estructuras en el país tiene una gran importancia debido a la industria petrolera por lo cual la norma ecuatoriana NEC debe tener un capítulo dedicado a la regulación de los mismos, como se da en el caso de las normas de otros países, que disponen de capítulos dedicados al diseño de tanques de contención o silos. La NEC menciona a este tipo de estructuras como de ocupación especial, por lo cual se recomienda realizar un análisis del desempeño de la estructura en el rango inelástico, para entender mejor el comportamiento dinámico real de la estructura.



5. BIBLIOGRAFÍA

- Chang, J. I., & Lin, C.-C. (2006). A study of storage tank accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19(1), 51–59.
- Compagnoni, M. E., Curadelli, O., & Martínez, C. A. (2012). Análisis del Comportamiento Dinámico de Tanques Cilíndricos Bajo Excitación Sísmica. *Mecánica Computacional, Volume XXXII. Number 23. Structural Dynamics*.
- Compagnoni, M. E., & Martínez, C. A. (n.d.). Mitigación de daños en tanques contenedores de líquido bajo excitación sísmica, con optimización de costos.
- Di Carluccio, A., Fabbrocino, G., & Manfredi, G. (2008). FEM seismic analysis of steel tanks for oil storage in industrial facilities. In *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Gobierno del Distrito Federal. Normas técnicas complementarias sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las edificaciones, Anteproyecto del Comité de Normas, México, DF (2004).
- Haroun, M. A. (1983). Vibration studies and tests of liquid storage tanks. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 11(2), 179–206.
- Haroun, M. A., & Housner, G. W. (1981). Seismic design of liquid storage tanks. *Journal of the Technical Councils of ASCE*, 107(1), 191–207.
- Hernández, S. (2007). Comparación del diseño sísmico de estanques de acero según normas Norteamericana, Neozelandesa y las recomendaciones Chilenas. *Concepción, Chile : Universidad Católica de La Santísima Concepción*.
- Malhotra, P. K., Wenk, T., & Wieland, M. (2000). Simple procedure for seismic analysis of liquid-storage tanks. *Structural Engineering International*, 10(3), 197–201.
- Newmark, N. M., & Hall, W. J. (1982). Earthquake spectra and design. *Earth System Dynamics*, 1.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. Peligro sísmico y requisitos de diseño sismo resistente (2014).
- Petroecuador, E. P. (2013). El petróleo en el Ecuador, la nueva era petrolera. Junio.
- Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. NSR-10, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá (2010).
- Standard, A. P. I. (2007). 650. *Welded Steel Tanks for Oil Storage*,.
- Standard, B. (2003). Design of structures for earthquake resistance. *Part 4: Silos, Tanks and Pipelines. Eurocode 8: Design of Structures*.
- Veletsos, A. S., & Auyang, J. (1977). Earthquake response of liquid storage tanks. In *Advances in Civil Engineering through Engineering Mechanics* (pp. 1–24).



6. ANEXO A

TANQUE 2 - FACTOR DE PARTICIPACION MODAL DE LA MASA					
MODO	Periodo (s)	FPM Eje X	FPM Eje Y	FPM Acumulado Eje X	FPM Acumulado Eje Y
1	4,6821	0,0007	0,6190	0,001	0,619
2	4,6821	0,6190	0,0007	0,619	0,619
39	0,0529	0,0330	0,0230	0,652	0,642
40	0,0529	0,0230	0,0330	0,675	0,675
41	0,0522	0,0540	0,1040	0,729	0,779
42	0,0522	0,1040	0,0540	0,833	0,833
46	0,0514	0,0000	0,0300	0,833	0,863
47	0,0514	0,0300	0,0000	0,863	0,863
63	0,0456	0,0017	0,0002	0,865	0,864
64	0,0456	0,0002	0,0017	0,865	0,865
72	0,0447	0,0036	0,0053	0,869	0,871
73	0,0447	0,0053	0,0036	0,874	0,874
100	0,0409	0,0042	0,0043	0,878	0,878
101	0,0409	0,0043	0,0042	0,883	0,883
127	0,0334	0,0074	0,0067	0,890	0,889
128	0,0334	0,0067	0,0074	0,897	0,897
180	0,0253	0,0210	0,0260	0,918	0,922
181	0,0253	0,0260	0,0210	0,944	0,944
210	0,0199	0,0018	0,0068	0,945	0,950
211	0,0199	0,0068	0,0018	0,952	0,952
223	0,0150	0,0055	0,0095	0,958	0,962
224	0,0150	0,0095	0,0055	0,967	0,967
248	0,0116	0,0009	0,0012	0,968	0,968
249	0,0116	0,0012	0,0009	0,969	0,969

Tabla 6. FPM Tanque 2



TANQUE 3 - FACTOR DE PARTICIPACION MODAL DE LA MASA					
MODO	Periodo (s)	FPM Eje X	FPM Eje Y	FPM Acumulado Eje X	FPM Acumulado Eje Y
1	4,4974	0,3150	0,2240	0,315	0,224
2	4,4974	0,2240	0,3150	0,539	0,539
36	0,0694	0,0800	0,0830	0,619	0,622
37	0,0694	0,0830	0,0800	0,702	0,702
52	0,0587	0,1340	0,0130	0,836	0,715
53	0,0587	0,0130	0,1340	0,849	0,849
58	0,0569	0,0001	0,0160	0,849	0,865
59	0,0569	0,0160	0,0001	0,866	0,866
60	0,0567	0,0190	0,0003	0,884	0,866
61	0,0567	0,0003	0,0180	0,884	0,884
75	0,0532	0,0001	0,0019	0,884	0,886
76	0,0532	0,0019	0,0001	0,886	0,886
100	0,0477	0,0004	0,0000	0,887	0,886
101	0,0477	0,0000	0,0004	0,887	0,887
119	0,0455	0,0024	0,0130	0,889	0,899
120	0,0455	0,0130	0,0024	0,902	0,902
145	0,0396	0,0008	0,0006	0,903	0,902
146	0,0396	0,0006	0,0008	0,903	0,903
168	0,0345	0,0063	0,0054	0,909	0,908
169	0,0345	0,0054	0,0063	0,915	0,915
190	0,0318	0,0021	0,0052	0,917	0,920
191	0,0318	0,0052	0,0021	0,922	0,922
223	0,0269	0,0150	0,0140	0,937	0,936
224	0,0269	0,0140	0,0150	0,952	0,952
258	0,0203	0,0024	0,0024	0,954	0,954
259	0,0203	0,0024	0,0024	0,956	0,956

Tabla 7. FPM Tanque 3



TANQUE 4 - FACTOR DE PARTICIPACION MODAL DE LA MASA					
MODO	Periodo (s)	FPM Eje X	FPM Eje Y	FPM Acumulado Eje X	FPM Acumulado Eje Y
1	4,4028	0,4060	0,0980	0,406	0,098
2	4,4028	0,0980	0,4060	0,503	0,503
45	0,0693	0,1870	0,2080	0,690	0,711
46	0,0693	0,2080	0,1870	0,898	0,898
72	0,0577	0,0003	0,0023	0,900	0,902
73	0,0577	0,0023	0,0003	0,902	0,902
85	0,0562	0,0011	0,0001	0,903	0,902
86	0,0562	0,0001	0,0011	0,903	0,903
96	0,0537	0,0014	0,0015	0,905	0,905
97	0,0537	0,0015	0,0014	0,906	0,906
139	0,0463	0,0004	0,0002	0,907	0,907
140	0,0463	0,0002	0,0004	0,907	0,907
175	0,0407	0,0014	0,0004	0,914	0,913
176	0,0407	0,0004	0,0014	0,915	0,915
213	0,0347	0,0019	0,0000	0,917	0,915
214	0,0347	0,0000	0,0019	0,917	0,917
225	0,0328	0,0040	0,0039	0,921	0,920
226	0,0328	0,0039	0,0040	0,925	0,925
263	0,0281	0,0140	0,0083	0,939	0,933
264	0,0281	0,0083	0,0140	0,947	0,947
304	0,0207	0,0061	0,0011	0,953	0,948
305	0,0207	0,0011	0,0061	0,954	0,954
314	0,0185	0,0050	0,0035	0,959	0,958
315	0,0185	0,0035	0,0050	0,963	0,963
344	0,0125	0,0097	0,0076	0,973	0,970
345	0,0125	0,0076	0,0097	0,980	0,980

Tabla 8. FPM Tanque 4

TANQUE 5 - FACTOR DE PARTICIPACION MODAL DE LA MASA					
MODO	Periodo (s)	FPM Eje X	FPM Eje Y	FPM Acumulado Eje X	FPM Acumulado Eje Y
1	4,3092	0,3250	0,1120	0,325	0,112
2	4,3092	0,1120	0,3250	0,437	0,437
45	0,0847	0,2060	0,1990	0,643	0,636
46	0,0847	0,1990	0,2060	0,842	0,842
60	0,0675	0,0220	0,0370	0,864	0,879
61	0,0675	0,0370	0,0220	0,901	0,901
86	0,0611	0,0018	0,0007	0,906	0,905
87	0,0611	0,0007	0,0018	0,906	0,906
97	0,0599	0,0008	0,0006	0,907	0,907
98	0,0599	0,0006	0,0008	0,908	0,908
119	0,0580	0,0050	0,0033	0,913	0,911
120	0,0580	0,0033	0,0050	0,916	0,916
131	0,0550	0,0010	0,0016	0,917	0,918
132	0,0550	0,0016	0,0010	0,919	0,919
156	0,0518	0,0005	0,0000	0,919	0,919
157	0,0518	0,0000	0,0005	0,919	0,919
198	0,0439	0,0018	0,0011	0,921	0,920
199	0,0439	0,0011	0,0018	0,922	0,922
221	0,0408	0,0011	0,0002	0,923	0,922
222	0,0408	0,0002	0,0011	0,923	0,923
255	0,0359	0,0034	0,0007	0,927	0,924
256	0,0359	0,0007	0,0034	0,927	0,927
275	0,0334	0,0065	0,0013	0,934	0,929
276	0,0334	0,0013	0,0065	0,935	0,935
305	0,0294	0,0092	0,0034	0,944	0,939
306	0,0294	0,0034	0,0092	0,948	0,948
343	0,0217	0,0057	0,0045	0,953	0,952
344	0,0217	0,0045	0,0057	0,958	0,958

Tabla 9. FPM Tanque 5